

# 高效阻氚涂层的研究进展与新型设计思路

## 摘要

在迈向聚变能商业化的进程中，聚变堆氚安全包容已成为制约百万千瓦级聚变发电站发展的关键瓶颈之一。对于百万千瓦功率的聚变堆，系统内每日在线循环的氚总量达十几公斤。然而，基于极其严格的辐射防护标准，聚变设施向环境的允许氚排放量被限制在极低的水平（数十 Ci 级别）。海量的氚滞留量与近乎零排放的安全要求之间形成了巨大矛盾，亟需开发高效、长寿命的阻氚屏障，以彻底阻断氚通过结构材料（如第一壁、管道等）的渗透与扩散。

目前，针对氚阻挡层的研究多采用物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）等常规制备技术。然而，现有涂层普遍存在致密度不足、界面结合力弱、内应力大易开裂以及高温辐照下阻氚性能迅速退化等致命缺陷，难以满足聚变堆苛刻的服役环境。针对上述痛点，本项目拟提出一种基于先进载能离子束技术制备高效阻氚涂层的全新解决方案，其核心创新点主要体现在制备技术的升级与涂层结构的仿生设计两方面。

首先，在制备技术上，本项目摒弃传统沉积方法，引入先进的磁过滤阴极弧（FCVA）载能离子束技术。该技术通过磁过滤装置彻底滤除了大颗粒中性杂质，可获得高纯度、高离化率的金属/非金属离子。利用载能离子在基体表面的亚注入效应，不仅实现了涂层与基体之间的稳定结合，还能在较低温度下原位生长出无孔洞、无柱状晶缺陷的极高致密涂层，从物理路径上直接切断了氚的快速扩散通道。

其次，在结构设计上，本项目突破传统单层阻挡的局限，提出构建“类皮肤”多功能梯度涂层结构。涂层被精巧地设计为“阻氚层-储氚层”复合体系。外层阻氚层依托高致密、低氚溶解度的陶瓷或金属间化合物，发挥“物理屏蔽”功能，将氚渗透率降至最低；内层储氚层则利用特定材料与氚的可逆 trapping 效应，构建“化学捕获”缓冲区。当微量氚突破阻氚层时，会被储氚层定点吸附固定，形成动态平衡，有效缓解了氚在涂层/基体界面的富集与侧向扩散，实现“阻-储”协同增效。

综上，本项目通过“高能束流精密调控 + 仿生类皮肤结构设计”的双轮驱动，可为解决聚变堆海量氚的安全包容难题提供革命性的材料方案，不仅具有重要的科学价值，更为我国聚变工程的实质性推进提供坚实的安全技术保障。

## 关键词

聚变堆；氚安全包容；磁过滤载能离子束；类皮肤涂层；阻氚层；储氚层

## Abstract

Safe tritium containment is a critical bottleneck for gigawatt-level fusion power plants. The massive daily tritium circulation (up to tens of kilograms) to sustain plasma burnup strictly contradicts the near-zero environmental emission limits (on the order of tens of Curies). Conventional barrier coatings prepared by traditional methods suffer from poor density, weak adhesion, and rapid performance degradation under harsh fusion environments.

To address this, we propose a novel approach utilizing advanced filtered energetic ion beam technology to prepare highly efficient tritium barrier coatings. This technique thoroughly eliminates macroparticle impurities, enabling the *in-situ* growth of ultra-dense, columnar-free coatings with robust pseudo-diffusion interfacial bonding. This fundamentally eliminates micro-defects and physically blocks tritium fast diffusion pathways. Furthermore, we pioneer a biomimetic “skin-like” gradient structure comprising a “tritium-blocking layer” and an inner “tritium-storage layer.” The outer dense ceramic or intermetallic layer provides primary physical shielding to minimize permeation, while the inner layer acts as a chemical capture buffer. It immobilizes any trace permeated tritium via reversible trapping effects, establishing a dynamic equilibrium that effectively prevents interfacial enrichment and lateral diffusion.

By combining precision energetic beam control with this synergistic “blocking-storage” structural design, this project develops a revolutionary barrier coating. It provides a crucial material solution for the safe containment of massive tritium inventories in future fusion engineering.

## Keywords

Fusion reactor; Tritium containment; Energetic ion beam; Skin-like coating; Tritium barrier

**Author:** 李, 鑫 (清华大学中国核电工程有限公司)

**Co-authors:** Mr 吴, 孟涵 (中国核电工程有限公司); Mr 廖, 斌 (北京师范大学); Mr 邢, 继 (中国核电工程有限公司); Mr 陈, 靖 (清华大学)

**Presenter:** 李, 鑫 (清华大学中国核电工程有限公司)

**Session Classification:** 工程博士论坛

**Track Classification:** 口头报告: 工程博士论坛